



## ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ РУЙНУВАННЯ ВКЛЮЧЕНЬ У ТВЕРДОМУ ТІЛІ (Огляд)

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. М. СЕРГІЄНКО, Ю. С. ОКРЕПКИЙ

*Проведено аналіз і синтез результатів досліджень моделювання процесів руйнування включень у твердому тілі, зокрема чавунів. Описано теоретично-експериментальні підходи до оцінки механізмів руйнування. Показано деякі закономірності, зміни фізико-механічних властивостей чавуну з різною формою графіту і типом матриці. Окремо проаналізована доцільність застосування методу АЕ в дослідженнях зародження і розвитку руйнування чавуну в умовах квазістатичного навантаження і відзначена висока ефективність цього методу неруйнівного контролю.*

*Analysis and synthesis of the results of investigation of inclusion fracture processes modeling in a solid, in particular, cast iron, was conducted. Theoretical-experimental approaches to evaluation of fracture mechanisms are described. Some regularities are demonstrated of variation of physico-mechanical properties of cast iron with different graphite shape and matrix type. Rationality of applying AE method in investigation of initiation and propagation of cast iron fracture under the conditions of quasi-static loading has been separately analyzed, and a high effectiveness of this NDT technique is noted.*

**Математичні моделі стану твердих тіл з включеннями та їх руйнування.** Під час роботи конструкцій включення, пори, прошарки, які містяться у матеріалах, призводять до виникнення біля них високих градієнтів напружень, значення яких залежить як від механічних характеристик включень, так і від їх форми та розмірів. Розв'язки задач, що моделюють певну структуру матеріалу з урахуванням впливу всіх факторів, зокрема форми включень, доволі громіздкі і незручні для практичного використання, а інколи і некоректні за своєю постановкою. Тому у прикладному аспекті важливим є розробка ефективних підходів щодо отримання простого аналітичного розв'язку задач про вплив конфігурації включення на величину напружень у ньому та їх концентрацію біля його вершини.

Так, чисельне визначення узагальнених коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) в однорідному середовищі з ізольованим тонким включенням неканонічної форми здійснене в наближеній модельній постановці задачі у працях [1, 2]. Побудові математичних моделей про руйнування та взаємодію тонких пружних включень у твердому тілі присвячено чимало праць [3–8]. У деяких з них, зокрема у праці [5], припущення про податливість включення дозволило виразити реакцію включення на деформацію матриці відносно простою моделлю типу основи Вінклера. У рамках цієї моделі отримано наближені аналітичні розв'язки для різноманітних схем зовнішнього навантаження та розміщення включення у матриці [8]. В інших — навпаки, до спрощення рівнянь приводило припущення про велику жорсткість включення [4, 6].

Найзагальнішою математичною моделлю, що відображає деформацію тонкого пружного включення в суцільному середовищі, можна вважати співвідношення, встановлене у праці [6]. Виходячи з тривимірної постановки задачі, у праці описаний метод і одержані умови стрибка напружень і переміщень на тонкостінному пружному включенні, з яких, як частинні випадки, випливають умови ідеального контакту та умови на розрізі з вільними від напружень поверхнями, а також на абсолютно жорсткому включенні.

Точний розв'язок тривимірних пружних задач для тіл з включеннями наштовхується, як відомо, на значні труднощі. Тому багатьма дослідниками запропоновано наближені підходи до розв'язання задач такого класу, що базується на модельному представленні взаємодії поверхонь тонких включень з матрицею [3–5, 9–18], де розглядалися як двовимірні, так і тривимірні задачі. Короткий огляд літератури, присвячений таким математичним моделям, приведено в роботі [9]. З метою отримання простіших рівнянь досліджувались випадки відносно м'яких [5, 13, 15, 16] і жорстких включень [4]. Встановлено характер асимптотики напружень поблизу тонкого жорсткого включення [4] і пружного клиноподібного включення [19]. Модельні співвідношення для тонкого пружного включення [6] повніші, оскільки враховують всю інформацію про деформацію поверхонь включення і задовольняють диференціальні рівняння рівноваги. За їх допомогою побудовані інтегродиференціальні рівняння відносно стрибків зміщень і напружень на поверхні включення під час дії на тіло силових і температурних факторів [20–23]. Однак на основі цих рівнянь поки що не отримані наближені замкнуті або точні розв'язки



відомих у літературі задач про еліптичне чи еліпсоїдальне включення в пластині чи у просторі за однорідного поля напружень.

Щодо просторових задач для тіл із жорстким включенням, то існують дослідження осесиметричних та асиметричних задач для нескінченного тіла з дископодібними включеннями, а також включеннями у вигляді еліптичного диска [12]. Найобґрунтованішим для отримання ефективних граничних умов, що визначають взаємодію включення з матрицею у випадку статичних задач теорії пружності є асимптотичний підхід [24–26]. Він базується на використанні параметра, що характеризує відношення товщини до лінійного розміру об'єкта. Такий метод дозволяє спростити умови контакту. Слід зазначити, що кількість наукових праць, що використовують цей метод — нечисленна.

У праці [27] запропоновано нову математичну модель тонкого пружного включення. З її допомогою задача зводиться до розв'язування системи сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь, які, зокрема, дають змогу отримати замкнутий розв'язок згаданих вище задач. Крім цього, виведено нові формули для обчислення розподілу напружень в околі вершини пружного включення, якщо відомий розв'язок відповідної сингулярної задачі, тобто задачі для тріщини, яка займає середню область включення. Такий підхід дозволяє врахувати вплив торцевих напружень у включенні на концентрацію напружень у матриці.

Впливові жорстких включень на напружено-деформований стан пластини присвячено чимало робіт [28]. Більшість з них стосувалася встановлення напружень в пластині в околі лінійних або криволінійних включень канонічної форми. Отримано точні замкнуті розв'язки пружної задачі у випадку кругового чи еліптичного включення у пластині [29–31]. Задачу для обмеженої пластини зі впаєм абсолютно жорстким еліптичним ядром розв'язано в комплексних потенціалах [32].

**Актуальність проблем експериментальних досліджень руйнування чавунів.** Для виготовлення окремих виробів і несучих елементів конструкцій в багатьох областях машинобудування застосовують чавуни. Використання цього матеріалу обумовлене унікальним узгодженням фізико-механічних і технологічних властивостей. Добрі ливарні властивості та оброблюваність різанням, здатність гасити вібрації, низька чутливість до концентраторів напружень, висока корозійна стійкість та низька собівартість — найважливіші переваги, що дають змогу застосовувати чавуни для виготовлення широкої гами деталей, елементів конструкцій та виробів. Високі статичні та динамічні міцнісні властивості чавуну сприяють використанню цього матеріалу в машинобудуванні [33–35].

Однак у літературі відомі непоодинокі випадки руйнування елементів конструкцій та виробів із чавуну, які не досягли свого критичного терміну експлуатації. Таким чином, часті випадки спонтанного руйнування засвідчують важливість дослідження чавуну, зокрема, впливу структури на механізми його руйнування та міцнісні характеристики.

Включення графіту у структурі чавуну в літературі прийнято розглядати як внутрішні дефекти відповідних розмірів, форми і розташування, які є концентраторами напружень та місцями зародження і розвитку руйнування. У теоретичному плані важлива задача визначення геометричних параметрів таких включень. Вирішення її полягає у розробці нових методів досліджень прямих контактних задач динамічної теорії пружності. Їх теоретична сторона передбачає математичне моделювання динамічної взаємодії складових композиту, яким фактично є чавун, а також розробку числових аналітичних алгоритмів дослідження механічних явищ, які при цьому виникають. Щодо алгоритму розв'язання відповідних обернених задач, то виникають певні труднощі теоретичного та обчислювального характеру, зумовлені нелінійністю та некоректністю обернених, а також недостатнім вивченням прямих задач.

Сучасні методи оцінки здатності матеріалів чинити опір розвитку тріщин зводяться, в основному, до визначення критеріїв, що характеризують перехід руйнування до закритичної стадії. Чисельні значення критеріїв встановлюються шляхом експериментальних випробувань зразків з надрізами чи введеними тріщинами від утомленості, які потім використовують для розрахункових оцінок. Як критерій опору крихкому руйнуванню використовують класичний критерій [36], який полягає у знаходженні певної величини навантаження, що характеризується точкою перетину діаграми руйнування з 5%-ю січною. Відповідні зусилля в цій точці прийнято вважати за навантаження старту введеної макротріщини від утомленості.

Для оцінки опору матеріалу руйнуванню в пружно-пластичній області найчастіше застосовують J-інтеграл, а стабільність розвитку руйнування оцінюють величиною динамічного КІН  $K_{Id}$ . Так, у праці [37] виконана експериментальна оцінка показників в'язкості руйнування (J-інтегралу) для зварного з'єднання чавуну (з кулеподібним графітом), що містить тріщини і здійснено аналіз напружено-деформованого стану за наявності тріщин різних розмірів. На основі одержаних результатів розглянуто вплив відмінностей  $\sigma_{0.2}$  у зоні навколо вершини тріщини, виходячи з показника тривісності напруження та величини пластичної деформації. Встановлено, що зі зростанням довжини тріщин показник тривісності



збільшується. Показано, що величина пластичної деформації матеріалу залежить від зони зварного з'єднання.

**Експериментальна оцінка механізмів руйнування чавунів методами неруйнівного контролю.** Виходячи з літературних даних чавуни класифікують у такій залежності: від ступеня графітизації (що обумовлює вид злому) — на сірий, білий і половинчастий (чи відбілений); від форми включень графіту — на чавуни з пластинчастим, кулеподібним (високоміцний чавун), вермикулярним графітом (ковкий); від характеру металічної основи — на перлітний, феритний, перлітно-феритний, аустенітний, бейнітний і мартенситний; від призначення — на конструкційний і чавун зі спеціальними властивостями; за хімічним складом — на легований і нелегований [38].

Механізм руйнування (крихкий або в'язкий) чавунів залежить від відстані між графітовими включеннями, форми цих включень (рис. 1) і складу матриці [39, 40].

У праці [41] експериментально вивчено вплив макроструктури високоміцних чавунів феритного, феритно-перлітного і перлітного класів на їх міцність і циклічну тріщиностійкість. На підставі отриманих результатів встановлено зв'язок міцнісних характеристик чавунів з параметрами їх структури та складу. У праці [42] вивчені особливості процесу зародження та росту тріщини у чавунах з різною формою графітових включень і експериментально визначені значення  $K_{Ic}$  матеріалів методом лазерної спекл-інтерферометрії. Встановлено, що зміна динаміки спеклів відбувається на завершальній стадії деформації, що передуює початку росту магістральної тріщини. У працях [43–45] розглянуто вплив кількості графітної фази на руйнування залізобуглецевих сплавів у залежності від параметра форми включень графіту та мікронапружень біля них, встановлено межі з підвищеною щільністю параметра форми включень.

Зменшення відстані між включеннями і збільшення їх гостроти, яка зростає під час зміни

форми включення від кулеподібної до вермикулярної і далі до пластинчастої, веде до підвищення концентрації напружень і виникнення локального тривісного напруженого стану на продовженні вершини макротріщини, що призводить до зменшення пластичної текучості. Звідси крихкий механізм руйнування чавунів (наприклад, сірого) [46, 47], де за невеликої відстані між графітовими включеннями атомарно тонкі пластинки графіту разом з макротріщиною створюють високу концентрацію напружень. Руйнування ж ковкого чавуну проходить за в'язким механізмом, оскільки через великі відстані між включеннями локальна концентрація напружень біля гострокутних виступів вермикулярного графіту не впливає істотно на розподіл напружено-деформованого стану біля вершини тріщини.

Проміжне місце займає високоміцний чавун. У ньому, не дивлячись на меншу концентрацію напружень через кулясту форму графіту, в 1,5...2 рази менша відстань між включеннями, ніж у ковкому. Тому високоміцний чавун, залежно від складу матриці, руйнується за крихким, в'язким або змішаним механізмом руйнування. Пластичність матриці зростає в наступній послідовності: пластинчастий перліт, зернистий перліт, перліт-ферит, ферит. Мікромеханізми руйнування є крихкими для матриці з пластинчастого і зернистого перліту, в'язкими з ділянками сколу — для перлітно-феритної матриці, в'язкі — для феритної матриці [48, 49].

У низці інших робіт [50–59] зроблено огляд ультразвукового методу дослідження структури чавунів, а також показано вплив форми графітових включень, їх розміру та кількості на механічні характеристики чавуна. Розглянуті залежності швидкості поширення поздовжньої хвилі ультразвуку і зміни коефіцієнта зникання від структури металічної основи чавуна та його хімічного складу. Досліджено зміну швидкості розповсюдження пружних хвиль від характеру і об'ємного вмісту графітових включень. Розглянуто вплив кількості графітової фази на руйнування залізобуглецевих сплавів у залежності від параметра форми включень графіту та мікронапружень біля них. Описано розподіл мікронеоднорідної деформації в сталі поблизу неметалевих включень різних типів, які не мають схильності до утворення порожнин. З'ясовано особливості впливу температури, пластичності включення та міжповерхневих напружень на розподіл мікронеоднорідної деформації. Вивчено природу сплесків мікродоформаций, спричинених руйнуванням включень і розвитком проковзування уздовж границь включення-матриця.

У працях [50–59] також встановлено, що у матеріалах, які містять неоднорідності з різко відмінними пружними характеристиками (високоміцні чавуни з пластинчастими або кулеподібни-

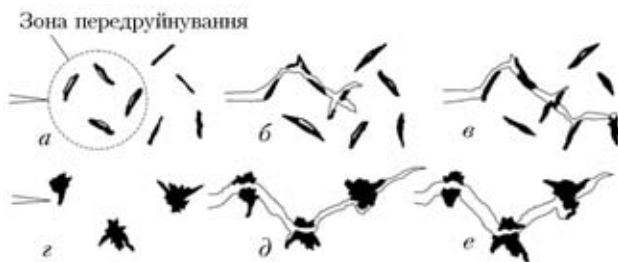


Рис. 1. Схеми процесів, що проходять під час росту тріщини в сірому (а–в) та ковкому (г–е) чавунах: а, г — формування зони передруйнування; б — розгалуження тріщини; в — закриття тріщини внаслідок попадання графітового включення між береги тріщини; д — ріст тріщини по міжфазних границях і через графітові включення; е — закриття тріщини внаслідок високої рельєфності злому [40]



ми включеннями), спостерігається залежність швидкості поздовжніх хвиль  $c$  від форми включень. На рис. 2 по осі абсцис відкладене відношення швидкості поздовжніх хвиль у даному матеріалі до швидкості поздовжніх хвиль у сталі 40. Частота ультразвукових коливань 2,5 МГц; нуль відповідає наявності тільки пластинчатого графіту.

Подібна залежність може бути отримана також шляхом вимірювання коефіцієнта зникання  $\alpha$  на різних частотах. Однак вимірювання швидкості забезпечує більшу точність під час визначення впливу включень, особливо на частотах до 5 МГц, а для деяких сплавів роздільну здатність визначення структури можна суттєво підвищити шляхом вимірювання відношення  $\alpha/c$ .

Розробка методів, що базуються на зв'язку магнітних і електричних властивостей чавунів з їх мікроструктурою та механічними властивостями, і створення на їх основі засобів неруйнівного контролю, має великий практичний інтерес. Окрім того, знання фізичних властивостей, експлуатаційних характеристик може допомогти у розумінні механізмів і процесів структуроутворення чавунів, що дозволить вирішити шляхи підвищення експлуатаційних характеристик їх виливок у кожному конкретному випадку.

Праці [60–62] присвячені вивченню магнітних, електричних, термоелектричних і механічних властивостей чавунів з різною формою графіту і хімічним складом, що використовуються для виготовлення виливок різного призначення, з метою відшукування параметрів неруйнівного контролю їх властивостей. Для випробовувань використовували промислові і спеціально виплавлені чавуни. Зразки чавуну марки ВЧ42-12 розмірами 10×10×63 мм вирізали із різних ділянок литих заготовок, відібраних у виробничому потоці. Залежності між хімічним складом (С, Si, Mn) і магнітними параметрами чавуну не встановлено, оскільки окрім хімічного складу великий вплив на магнітні властивості спричиняє кількість і форма включень графіту. Відзначено, що за вмісту магнію менше 0,03 % отримуються перлітні чавуни, які містять лише пластинчатий графіт. Показана можливість неруйнівного контролю структури і твердості відливок з високоміцного чавуна. Запропонована методика і розроблений первинний перетворювач, що дозволяє визначати пластинчасту форму графіту потенціалометричним методом на локальній ділянці виливки чавуну. Контроль твердості, наявності кулеподібного графіту і склад відбілу можна здійснити за результатами вимірювань струму розмагнічення за допомогою коерцитиметра. Підтверджено, що з підвищенням вмісту фосфору росте твердість чавуна; металічна основа складається з перліту і фосфідної евтектики, збільшення кількості якої приводить до рос-

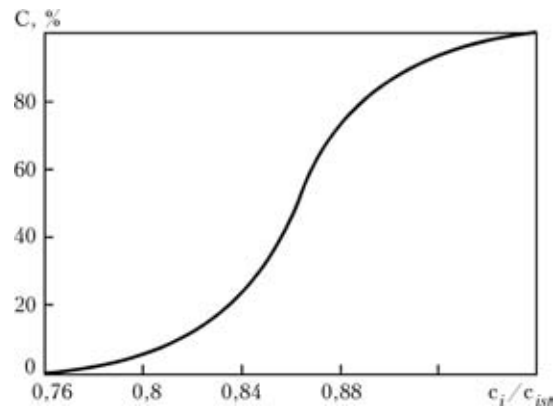


Рис. 2. Залежність відношення  $c_i/c_{ist}$  від відсоткового вмісту кулеподібного графіту в чавуні

ту твердості, коерцитивної сили і електроопору. Збільшення вмісту фосфору від 1,6 до 3,0 % слабо впливає на зміну досліджуваних характеристик чавуна. Показано принципову можливість експресного визначення термоелектричним методом, за допомогою пристрою ТЭС-4 за умови  $C < 3,4\%$  і  $Si < 2,5\%$  вмісту у чавуні без урахування впливу вмісту марганцю.

Встановлені закономірності зміни фізико-механічних властивостей чавунів з різним структурним станом можуть бути використані для модернізації відомих і розробки нових принципів отримання інформації про дефекти структури і фізико-механічного стану чавунних виробів.

**Акустико-емісійне дослідження розвитку руйнування чавунів.** Як показано в роботах [48, 63, 64], на початкових стадіях руйнування пошкоджені області розвиваються всередині матеріалу і локально поширюються в стиснутій зоні зразка, тому виявити їх оптично, як того вимагають методики нормативних документів, неможливо. Після цього, унаслідок злиття мікротріщин у макротріщини, відбувається вихід останніх на бокову поверхню зразка вже після суттєвого розвитку руйнування [63]. Тому для ефективного виявлення скритих початкових стадій руйнування чавунів застосовують метод акустичної емісії (АЕ) [63, 64]. Аналіз одержаних результатів АЕ-контролю, фрактографії і літературних джерел [48, 49, 64–68] дав можливість описати механізми і динаміку процесів руйнування високоміцного, ковкого і сірого чавунів і сформулювати моделі докритичного розповсюдження в них макротріщин, що супроводжується випромінюванням АЕ. Показано високу ефективність методу АЕ для оцінки стадій та механізмів руйнування чавунів різноманітної модифікації. У роботі [48] приведені результати сумісних АЕ- і фрактографічних досліджень руйнування чавунів. Випробування триточковим згином проводили на зразках з сірого, ковкого і високоміцного чавунів. Результати показали, що параметри сигналів АЕ відрізняються залежно від механізму руйнування чавунів.



Запропоновані моделі, що описують руйнування чавунів за монотонного навантаження зразків, на підставі яких одержана залежність між сумарним рахунком АЕ і КІН. Одержана добра відповідність теоретичних і експериментальних результатів. Як і під час випробування сталей [69], сигнали АЕ з більшою амплітудою реєструвалися за руйнування зразків сколом, а за в'язкого руйнування їх амплітуди мали тенденцію зменшуватись.

У роботі [65] оцінювали вплив модифікацій матриці високоміцного чавуну (ВЧ) на початок розвитку макротріщин. Визначали момент старту макротріщин і відповідних йому КІН за сигналами АЕ у ВЧ, який мав різні типи матриць: феритну, із пластинчатим перлітом, із зернистим перлітом і феритно-перлітну. Для експериментів були виготовлені призматичні зразки перерізом 12×18 мм з виведеними крайовими тріщинами від утомленості. Хімічний склад ВЧ наступний, мас. %: 2,44 С; 0,42 Мп; 1,37 Si; < 0,05 Cr; 0,13 P; 0,11 S. Випробовували зразки за схемою навантаження триточковим згином. Для кожного типу чавунів, залежно від складу матриці, параметри сигналів АЕ були різними (рис. 3). Проте на кожній акустограмі чітко виділяється момент різкого наростання амплітуд сигналів АЕ (САЕ). Фрактографічний аналіз показав [48], що САЕ на ранніх етапах на-

вантаження генеруються під час відшарування графіту від металічної матриці, руйнування графітових включень, утворення мікротріщин, їх підростання і зливання з утворенням макротріщин. А різке наростання амплітуд САЕ відповідає моменту старту макротріщини [63].

На діаграмах руйнування в координатах «навантаження  $P$ —розкриття берегів тріщини  $v$ » (рис. 3), показано навантаження, за яких в зразках починається субкритичний ріст магістральної тріщини  $P_S^A$ , зафіксований за допомогою методу АЕ, і визначені за стандартною методикою  $P_S$  та максимальне навантаження, за якого зразок руйнується  $P_{max}$ .

За типом діаграм  $P-v$  і акустограм чавуну з різними модифікаціями матриці суттєво відрізняються. Так, для ВЧ з матрицею пластинчатого і зернистого перліту характерне спонтанне руйнування і висока акустична активність, яка стрибкоподібно зростає ще до того, як настає руйнування зразка. За даними мікрофрактографічних досліджень, зона переходу тріщини від утомленості до долому у ВЧ зі структурою пластинчатого і зернистого перлітів чітко фіксується під час розповсюдження магістральної тріщини міжзеренного сколу. На поверхні долому виявлено куле-

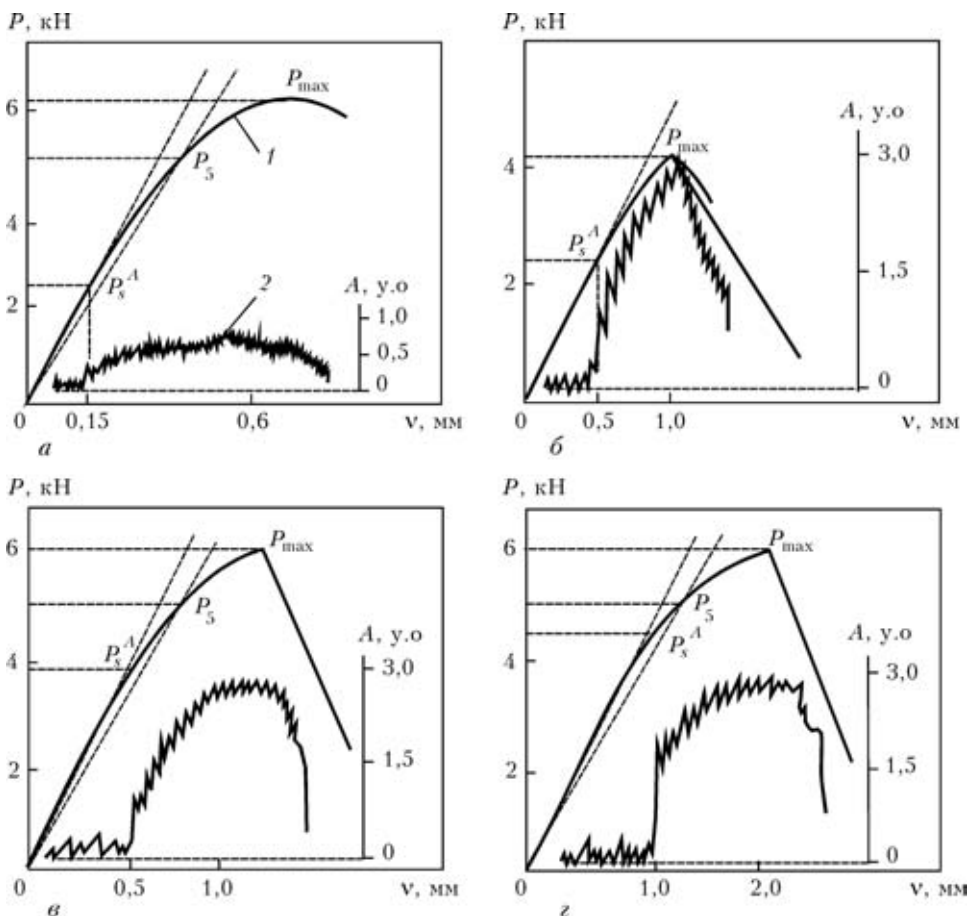


Рис. 3. Діаграми руйнування чавунів з різними типами матриць: а — феритна матриця; б — пластинчатий перліт; в — зернистий перліт; з — феритно-перлітна матриця



подібні частини графіту, як правило, відшаровані від матриці. В доломах ВЧ з перлітно-феритною матрицею поміж елементами міжзеренного сколу є обширні ділянки в'язкого ямкового руйнування [48].

Як впливає із експериментів, визначені величини  $P_S^A$  є меншими від величин  $P_S$  і значно меншими від  $P_{max}$ , тому для чавунів, залежно від складу матриці, відношення  $K_{I_{max}}$  до  $K_{I_S}$  знаходиться в межах від 1,15 до 2,42. Значення цих КІН визначають за відомою формулою

$$K_I = \frac{PL}{t\sqrt{b^3}} Y\left(\frac{l}{b}\right),$$

де  $P$  — зусилля навантаження;  $L$  — відстань між опорами;  $t$  — товщина,  $b$  — висота зразка;  $Y$  — поправочна функція;  $l$  — довжина тріщини.

У працях вітчизняних і зарубіжних авторів описані підходи до визначення стану конструкцій за величиною  $K_{Ic}$ ,  $J$ -інтегралу або  $K_d$ . Відомі праці, в яких встановлена теоретична залежність між  $K_{Ic}$  і активністю АЕ [70–73]. Дослідженню зв'язку між критеріями руйнування  $K$  і  $K_I$  та параметрами випромінювання АЕ присвячено праці [71–75].

Узагальнюючи дослідження, де вивчали взаємозв'язок між тріщиностійкістю матеріалу і АЕ, відзначимо, що встановлені залежності, як правило, не є універсальними і справедливі лише для певних умов навантаження, конфігурацій тріщин тощо. У всіх роботах не визначений однозначно коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Його величина може істотно змінюватись залежно від швидкості навантаження, резонансних характеристик первинних перетворювачів, діапазону частот. Сумарна емісія не завжди пропорційна об'єму матеріалу, залученого в пластичну деформацію. Проте розглянуті моделі відображають сучасні уявлення про природу АЕ, добре корелюють з експериментальними даними, тому потребують подальшого розвитку та удосконалення.

## Висновки

Руйнування включень у твердому тілі є основною причиною початкової фази руйнування. Ці процеси в літературі розглядаються як з точки зору математичного моделювання, так і з позицій оцінки даних експериментальних досліджень.

Широке застосування чавунів зумовлює всестороннє дослідження їх властивостей з метою покращення структурних, а відтак і фізико-механічних характеристик. З цією метою застосовують як теоретичне моделювання, так і різноманітні методи експериментальних випроб. Серед останніх неухильно розширюється сфера застосування методів неруйнівного контролю.

Метод АЕ успішно застосовується для діагностування виробів і елементів конструкцій із ча-

вунів. Для цього використовують кореляційні залежності між комплексними інформативними характеристиками АЕ і критеріями руйнування. АЕ-методики дозволяють визначати момент старту макротріщини під квазістатичним навантаженням точніше ніж за методиками, що регламентовані у нормативних документах.

*Проведен анализ и синтез результатов исследований моделирования процессов разрушения включений в твердом теле, в частности, чугунов. Описаны теоретические и экспериментальные подходы к оценке механизмов разрушения. Показаны некоторые закономерности изменения физико-механических свойств чугуна с различными формами графита и типом матрицы. Отдельно проанализирована целесообразность применения метода АЕ в исследовании зарождения и развития разрушения чугуна в условиях квазистатического нагружения и отмечена высокая эффективность этого метода неразрушающего контроля.*

1. Сулим Г. Т. Влияние формы тонкостенного включения на концентрацию напряжений в пластине // Физ.-хим. механика материалов. — 1981. — № 3. — С. 64–68.
2. Сулим Г. Т. Антиплоская задача для системы линейных включений в изотропной среде // ПММ. — 1981. — 45, № 2. — С. 308–318.
3. Грилицький Д. В., Сулим Г. Т. Напряженное состояние кусочно однородной плоскости с тонкостенным упругим включением конечной длины // Прикл. механика. — 1972. — 8, № 11. — С. 58–65.
4. Канаун С. К. Тонкий дефект в однородной упругой среде. Исследование по теоретическим основам расчета строительных конструкций // Межвуз. темат. сб. тр. ЛИ-СИ. — 1983. — С. 75–84.
5. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Стадник М. М. Пружина рівновага необмеженого тіла з тонким включенням // Доп. АН УРСР. Сер. А. — 1976. — № 7. — С. 636–639.
6. Підстригач Я. С. Умови стрибка напружень і переміщень на тонкостінному пружному включенні в суцільному середовищі // Там же. — 1982. — № 12. — С. 29–31.
7. Силованюк В. П. Жесткое пластическое включение в упругом пространстве // Физ.-хим. механика материалов. — 1984. — № 5. — С. 80–84.
8. Панасюк В. В., Стадник М. М., Силованюк В. П. Концентрация напряжений в трехмерных телах с тонким включением. — Киев: Наук. думка, 1986. — 216 с.
9. Стадник М. М. Об одном методе приближенного решения трехмерной упругой задачи для тела с тонким включением // Физ.-хим. механика материалов. — 1988 — № 1. — С. 53–65.
10. Стадник М. М. Интегро-дифференциальные уравнения трехмерной задачи теории упругости для тела с системой тонких включений // Там же. — 1984. — № 1. — С. 15–21.
11. Стадник М. М., Андрейкив А. Е. Прочность материалов, содержащих системы тонких включений // Там же. — 1986. — № 1. — С. 29–35.
12. Силованюк В. П. Руйнування попередньо напружених і трансверсально-ізотропних тіл із дефектами // НАН України. Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. — 2000. — 300 с.
13. Чобаняк К. Р., Хащяк А. С. Плоское деформированное состояние упругого тела с тонкостенным гибким включением // Изв. АН АрмССР. — 1967. — № 6. — С. 19–29.



14. Грилицький Д. В., Сулим Г. Т. Периодическая задача для упругой плоскости с тонкостенным включением // ПММ — 1975. — 39, № 3. — С. 520–529.
15. Chez R. Equilibre mecanique et de forme de petits cristaux // Helvetica phys. Acta. — 1968. — 41, № 3. — P. 287–309.
16. Солтыкова О. В., Черепанов Г. П. Некоторые задачи неоднородной теории упругости // Физ.-хим. механика материалов. — 1974. — № 3. — С. 539–550.
17. Грилицький Д. В., Опанасович В. К., Тисовський Л. О. Упругое состояние пластины с круговой шайбой и прямолинейным включением // ПММ. — 1982. — № 6. — С. 993–1000.
18. Александров В. М., Мхитарян С. М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. — М.: Наука, 1983. — 487 с.
19. Мовчан А. Б., Назаров С. А. Асимптотика НДС вблизи пространственного пикообразного включения // Механика композит. материалов. — 1985. — № 5. — С. 792–800.
20. Предельно-равновесное состояние упругопластических тел с тонкими включениями, подвергающихся воздействию температурных и силовых факторов / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, М. М. Стадник, Я. Ю. Морозович // Тез. докл. I Всесоюз. конф. «Механика неоднородных структур». Львов, 6–8 сент. — 1983, Киев: Наук. думка, 1983. — С. 170–171.
21. Хай М. В. Интегральні рівняння задачі про визначення напружень в тілі з тонким чужорідним включенням // ДАН УРСР Сер. А. — 1984. — № 3. — С. 43–46.
22. Хай М. В. Визначення температурних полів і напружень в тілах з тонкими теплопровідними включеннями // Там же. — 1984. — № 11. — С. 48–52.
23. Стадник М. М., Морозович Я. Ю. Термоупругая задача для выпуклого многогранника с системой тонких включений // Физ.-хим. механика материалов. — 1986. — № 2. — С. 39–43, № 3. — С. 89–96.
24. Кит Г. С., Емец В. Ф., Кунец Я. И. Асимптотическое поведение задачи рассеяния упругой волны тонкостенным инородным включением // Известия РАН. Механика твердого тела. — 1999. — № 3. — С. 55–64.
25. Порховський В. В., Кунец Я. І. Дифракція імпульсів пружних хвиль тонкими слабкими неоднорідностями // Мат. методи та фіз.-мех. поля. — 1999. — 42, № 2. — С. 168–174.
26. Кунец Я. І., Матус В. В., Міщенко В. О. Дистанційне визначення фізико-механічних параметрів тонкостінних дефектів // Физ.-хим. механика материалов. — 2000. — № 5. — С. 117–118.
27. Стадник М. М. Метод розв'язування тривимірних термопружних задач для тіла з тонким включенням // Там же. — 1994. — № 6. — С. 30–40.
28. Бережницький Л. Т., Панасюк В. В., Стацук Н. Г. Взаємодія жорстких лінійних включень і трещин в деформуючому тілі. — Киев: Наук. думка, 1983. — 228 с.
29. Hardiman N. J. Elliptic elastic inclusion in an infinite elastic plate // Quart. J. Mech. And Math. — 1954. — 7, № 2. — P. 25–43.
30. Труш І. І., Панасюк В. В., Бережницький Л. Т. О влиянии формы включения на начальную стадию разрушения двухкомпонентных композиционных материалов // Физ. хим. механика материалов. — 1972. — № 6. — С. 48–53.
31. Черепанов Г. П. Механика разрушения композиционных материалов. — М.: Наука, 1983. — 296 с.
32. Мухелисвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966. — 636 с.
33. Statische und dynamische Festigkeitswerte zeigen das mögliche Potenzial von unlegiertem Gusseisen mit Lamellengraphit // Konstr. — Giessen. — 2004. — 29, № 3. — S. 12–15.
34. Колодезний Л. А., Козырев Г. В., Митерев Г. И. Сравнительная оценка работы распространения трещины в высокопрочных чугунах и сталях / Алтайск. гос. техн. ун-т. Резервы пр-ва. строит. матер. — Барнаул, 1999. — С. 159–163.
35. Wieland R. Über die Geschichte des Eisenbaus und das Entstehen des Konstruktiven Ingenieurbaus. Stahlbau — 2001. — 70, № 9. — 628 p.
36. ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 62 с.
37. Hakan C., Bahadir U., Teyfik A. The effect of yield strength mismatch on the fracture behavior of welded nodular cast iron / 13 Intern. Conf. on the Strength of Materials, Budapest, 25–30 Aug. 2003. — № 1. — 3. 387–389; 2004. — № 2. — P. 357–360.
38. Структура та опір руйнуванню залізобуглецевих сплавів / О. П. Остап, І. П. Волчок, О. Б. Колотілкін та ін. // НАН України. Фіз.-механіч. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 2001. — 272 с.
39. Красовский А. Я., Калайда В. В. Прочность и трещиностойкость чугунов с шаровидным графитом. — Киев: Наук. думка, 1989. — 136 с.
40. Рост усталостной трещины в чугунах. II. Серый и ковкий чугуны / О. Н. Романив, А. Н.Ткач, Т. Я. Юськив и др. // Физ.-хим. механика материалов. — 1990. — № 3 — С. 33–40.
41. Андрейко І. М., Остап О. П., Попович В. В. Вплив мікроструктури на міцність і циклічну тріщиностійкість чавунів // Те саме. — 2002. — № 5. — С. 48–56.
42. Мониторинг процесса разрушения серых чугунов методом лазерной спекл-интерферометрии / А. П. Владимиров, С. В. Смирнов, С. В. Гладковский // Тез. 3-й Международ. конф. «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (MPFP) на базе 41-го Международ. семинара «Актуальные проблемы прочности», Тамбов, 23–27 июня, 2003. — Тамбов: Изд-во ТГУ, 2003. — С. 131–132.
43. Колотілкін О., Нагорний Ю. Вплив графітної фази на механізм руйнування FeC сплавів // Машинознавство. — 2004. — № 2. — С. 49–51.
44. Бережницький Л. Т., Панасюк В. В., Стацук Н. Г. Взаємодія жорстких включень і трещин в деформуючому тілі. — К: Наук. думка, 1983. — 288 с.
45. Колотілкін О. Взаємозв'язок між концентрацією напруження біля включення графіту і властивістю FeC сплавів // Машинознавство. — 2000. — № 10. — С. 9–14.
46. Мельников В. П., Садовский Е. А. Влияние графита на прочность серого перлитного чугуна в крупных отливках // Литейн. пр-во. — 1994. — № 8. — С. 7–8.
47. Haenny L., Zambelli G. The Role of the Matrix Graphite Interaction in the Tensile Behavior of Grey Cast Iron // Engineering Fracture Mechanics. — 1984. — 19, № 1. — P. 113–121.
48. Лисак Н. В., Скальський В. Р., Сергиенко О. Н. Использование метода акустической эмиссии для исследования разрушения чугунов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 3. — С. 37–45.
49. Вязкость разрушения высокопрочных материалов / Под ред. М. Л. Берштейна. — М.: Металлургия, 1973. — 309 с.
50. Буденков Г. А., Новожилов В. А., Шабалин В. Г. Ультразвуковой метод контроля твердости поверхности изделий из чугуна // Дефектоскопия. — 1992. — № 8. — С. 18–23.
51. Коваленко А. В., Лебедев А. А. Определение твердости чугуна акустическим методом // Там же. — 1992. — № 8. — С. 31–33.
52. Вакуленко И. А., Надеждин Ю. Л. О связи скорости счета импульсов акустической эмиссии с параметрами деформационного упрочнения углеродистой стали // Там же. — 1992. — № 12. — С. 49–53.
53. Воронкова Л. В. Влияние структуры чугуна на скорость и коэффициент затухания ультразвука // Там же. — 1991. — № 12. — С. 18–23.
54. Воронкова Л. В., Воронков В. А. Спектральный метод определения твердости чугуна // Там же. — 1990. — № 6. — С. 24–28.



55. Бронфин Б. М., Емельянов А. А., Пышминцев И. Ю. Микроструктурные аспекты вязкости разрушения и сопротивления усталости высокопрочных сталей // Физ.-хим. механика материалов. — 1991. — № 5. — С. 95–97.
56. Губенко С. И. Природа всплесков микронеоднородной деформации в стали с неметаллическими включениями // Там же. — 1999. — № 2. — С. 53–59.
57. Андрейко И. М. Особливості втомного руйнування графітових включень у чавунах і сталях // Те саме. — 2003. — № 1. — С. 111–112.
58. Влияние формы графитовых включений на концентрацию напряжений и механические свойства чугуна / И. П. Волчок, М. М. Стадник, В. П. Силованюк, та ін. // Там же. — 1984. — № 3 — С. 89–92.
59. Юзвак В. М., Волчок И. П. Влияние включений графита на механические свойства чугуна // Литейн. пр-во. — 1981. — № 2. — С. 7–8.
60. Контроль формы графита и структуры металлической основы в отливках из чугунов различного назначения / И. А. Кузнецов, С. С. Родионова, Э. С. Горкунов, и др. // Дефектоскопия. — 1996. — № 9. — С. 3–15.
61. Магнитный метод контроля формы графита в чугунах / И. А. Кузнецов С. В. Кочевых, С. С. Родионова и др. // Тез. докл. XII Всесоюз. науч.-техн. конф. «Неразрушающие физические методы контроля». Свердловск, 1990. — С. 157–158.
62. Горкунов Э. С., Сомова В. М., Ничипурук А. П. Магнитные свойства и методы контроля структуры и прочностных характеристик чугунных изделий (Обзор) // Дефектоскопия. — 1994. — № 10. — С. 54–83.
63. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. — Львів: Сполом, 2005. — 396 с.
64. Методические особенности определения статической трещиностойкости чугунов / А. Н. Ткач, Н. В. Лысак, Т. Я. Юськив и др. // Физ.-хим. механика материалов. — 1988. — № 1. — С. 68–73.
65. Skalsky V. R., Okrepkij Yu. S., Plakhtij R. M. Acoustic emission during cast-irons fracture // Proc. Int. III Sympos. Mechaniki Zniszczenia Materialow i Konstrukcji, Augustow 1–4 czerwca 2005. — Poland. Bialostock, 2005. — P. 369–371.
66. Косников Г. А. Теория и технология получения чугунов с повышенной вязкостью разрушения: — Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Ленинград, 1985. — 39 с.
67. Morgner W., Heyse H. Untersuchung der Bruchkinetik von GGL // Neue Hutte. — 1981. — 26, № 8. — S. 313–314.
68. Xu Chi, Rui-Zhen. Fracture toughness and fatigue of fracture of kare earth-magnesium ductile iron // AFS. International Casting Metals Journal. — 1979. — 4, № 3. — P. 21–28.
69. Связь акустической эмиссии с кинетикой и микромеханизмом усталостного разрушения высокопрочной стали мартенситной структуры / О. Н. Романов, Е. И. Кирилов, Ю. В. Зима, Г. Н. Никифорчин // Физ.-хим. механика материалов. — 1987. — 23, № 2. — С. 51–55.
70. Annual Book of ASTM Standards, E-399-72. — USA, 1972. — 1100 p.
71. Кудряшов В. Г. Методика оценки истинности определяемого параметра вязкости разрушения // Завод. лаб. — 1975. — № 11. — С. 1388–1390.
72. Иванова В. С., Ботвина Л. Р., Маслов Л. И. Фрактографический метод определения вязкости разрушения при пластической деформации пластических металлических материалов // Там же. — 1975. — № 8. — С. 1007–1010.
73. Kassef M. A. Fracture Toughness testing with Small Testpieces. — Welding Research International. — 1974. — № 4. — P. 28–40.
74. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Лысак Н. В. Акустическая эмиссия субкритически растущих трещин // Тез. докл. I Всесоюз. конф. «Акустическая эмиссия материалов и конструкций». — Ростов. гос. ун-т, 1984. — Ч. I. — С. 229–230.
75. Микитишин С. И., Сергиенко О. Н. Использование параметров акустической эмиссии для оценки разрушения материалов // Там же. — С. 230–232.

Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
Львів

Поступила до редакції  
16.02.2007

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Журнал «Техническая диагностика и неразрушающего контроль» входит в перечень утвержденных ВАК Украины изданий, публикации в котором засчитываются как обязательные для соискателей ученых степеней.

ВАК Украины принял постановление от 15.01.2003 г. № 7-05/01 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України». В соответствии с этим постановлением редакционные коллегии научных специализированных изданий, признаваемых ВАК, должны принимать к печати только те статьи, которые имеют следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными или практическими заданиями;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые ссылается автор;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящена данная статья;
- формулировка целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы из представленного исследования и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

Специализированным ученым советам при приеме к защите диссертационных работ предписано засчитывать статьи, опубликованные, начиная с февраля 2003 года, только при условии выполнения изложенных выше требований.

В связи с этим редколлегии журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» будет принимать к печати только те статьи, которые отвечают требованиям ВАК Украины.

Редакционная коллегия журнала